

織物ガラス-エポキシ積層材料の極低温破壊・変形挙動

著者	真田 和昭
号	2364
発行年	1998
URL	http://hdl.handle.net/10097/7637

方性を考慮した破壊靱性試験方法の開発を行う必要があり、極低温における非線形破壊挙動に注目したメゾメカニックス的研究も重要である。

広範囲な損傷形成が観察される準脆性材料の破壊挙動は、試験片寸法に強く依存することが報告されている。また、織物ガラスーエポキシ積層材料の極低温破壊靱性試験では、コンパクト (CT) 試験片の切欠き先端に損傷領域が形成されており、破壊靱性の定量的評価に関連して試験片寸法効果に関する研究が要望されている。損傷を考慮した複合材料の破壊挙動解明のための解析モデル・解析手法は幾つか提案されているが、織物ガラスーエポキシ積層材料を対象とした研究例は少なく、極低温環境における損傷形成のメカニズムに関しては未検討部分を多く残している。

超伝導マグネット用構造材料が使用される極低温環境下では、材料の比熱・熱伝導率が急激に低下し、わずかな発熱でも顕著な温度上昇の発生が予測される。4K における破壊靱性試験では、低負荷速度でも破壊に伴うわずかな発熱が破壊挙動に重要な影響を与えることが考えられる。また、超伝導マグネットの設計において重要な問題の一つに突発的クエンチがあり、その発生原因と考えられている材料の極低温破壊・変形に伴う発熱・温度上昇の評価方法確立も重要な研究課題である。

本研究は、以上の点に鑑み、従来から電氣的絶縁材料として広く用いられ、超伝導マグネットの電氣的熱的絶縁材料、構造支持材料としても応用されている織物ガラスーエポキシ積層材料 G-11 の極低温破壊・変形挙動に関する理論的・実験的研究を行ったもので、全編 6 章からなる。

以下に、各章で得られた結果の概要を述べる。

第 1 章 序論

本章では、積層材料の極低温破壊靱性評価方法の問題点および本研究で対象とした織物ガラスーエポキシ積層材料の極低温破壊・変形挙動に関する研究の位置付けを述べると共に、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第 2 章 極低温破壊および発熱・温度上昇

本章では、G-11 の極低温破壊靱性および発熱・温度上昇を評価するために、0.32TCT 試験片 (試験片幅 $W=20\text{mm}$, 試験片厚さ $B=8\text{mm}$) を用いた室温、液体窒素温度 (77K), 液体ヘリウム温度 (4K) における平面ひずみ破壊靱性試験 (K_{IC}) 試験を行った^{(7),(8)}。破壊靱性試験は、ISO 12737 規格および JSME S001 基準に準拠して行い、また、極低温破壊・変形に伴う発熱・温度上昇は、CT 試験片に熱電対を挿入して計測した。さらに、見掛けの破壊靱性を求め、試験温度、切欠き長さ、クロスヘッド速度の影響を詳細に検討し、走査電子顕微鏡 (SEM) による破面観察も行い、考察を加えた。

ISO 規格に準拠し、荷重－変位曲線の線形域の勾配より 5%低い勾配の直線と荷重－変位曲線の交点における荷重 P_Q を用いて求めた見掛けの破壊靱性 K_Q は、温度依存性を有し、切欠き長さ、クロスヘッド速度に依存しない結果を得た。また、JSME 基準に準拠して求めたへき開破壊靱性 J_C は、 K_Q と同様に温度依存性を有し、極低温において、 K_Q よりもばらつきが小さい結果を示した。さらに、試験温度 4K の場合、 J_C から求めた見掛けの破壊靱性 $K(J_C)$ は、 K_Q の 2.3 倍、荷重－変位曲線の最大荷重 P_{max} を用いた見掛けの破壊靱性 $K(P_{max})$ の 1.2 倍である。極低温下の G-11 の破壊靱性評価を ISO 規格に準拠して行った場合、破壊靱性を過小評価する傾向にあると考えられる。

極低温破壊・変形に伴う発熱・温度上昇は、試験温度 4K の場合のみ計測可能で、き裂進展量に対応し、クロスヘッド速度の増大に伴い、最大荷重以前から微小なき裂進展による発熱・温度上昇が頻

繁に計測されている。

SEM による損傷領域の観察の結果、室温の場合、き裂は試験片切欠き先端から直線的に進展し、損傷領域はあまり形成されなかった。しかし、77K および 4K では、試験片切欠き先端近傍に極低温特有の損傷領域が形成された。損傷領域は、エポキシ樹脂の複雑な割れ、ガラス繊維・エポキシ樹脂の界面剥離、ガラス繊維の破断等で構成され、極低温における荷重－変位曲線の非線形挙動および破壊靱性増大の原因と考えられる。また、ガラス繊維の破面は、室温と極低温で異なり、複合材料の破壊挙動に影響を及ぼす可能性があることを示した。

第3章 77K における破壊特性および寸法効果

本章は、G-11 の極低温破壊特性および寸法効果を解明するため、1TCT 試験片（試験片幅 $W=50\text{mm}$ 、試験片厚さ $B=25\text{mm}$ ）および 0.32TCT 試験片を用いた平面ひずみ破壊靱性 (K_{IC}) 試験および弾塑性破壊靱性 (J_{IC}) 試験を行ったもので、見掛けの破壊靱性に及ぼす試験片寸法の影響を詳細に検討した^{(9)~(11)}。また、切欠き先端近傍の損傷領域および破面の観察を行い、考察を加えた。 K_{IC} 試験は ISO 12737 規格に準拠して行い、 J_{IC} 試験は、ASTM E813-89 規格に準拠した複数試験片方法および JIS Z 2284 規格に準拠した単一試験片方法（除荷コンプライアンス法）を採用して行った。

室温および 77K における K_{IC} 試験を行った結果、いずれの温度においても見掛けの破壊靱性 K_Q および $K(P_{max})$ は、試験片寸法の増大に伴い増大し、1TCT 試験片の場合は、最大荷重以降直ちに不安定破壊せず、荷重降下を伴いながら破壊が進展した。また、77K における J_{IC} 試験を行った結果、0.32TCT 試験片の場合、十分な安定き裂進展が得られず、見掛けの破壊靱性 J_Q は評価できなかったが、1TCT 試験片では J_Q が得られ、 J_Q から求めた $K(J_Q)$ は、荷重－変位曲線の最大荷重 P_{max} から求めた $K(P_{max})$ と近い値を示した。さらに、見掛けの破壊靱性の寸法効果は、荷重－変位曲線の非線形挙動および損傷と密接に関係し、試験温度の低下に伴い弱くなる傾向を示しており、0.32TCT 試験片の場合に比べて、1TCT 試験片の場合、77K における荷重－変位曲線の非線形挙動に及ぼす損傷の影響が小さくなる結果を得た。破壊靱性評価には、1TCT 試験片を用いた方が有効である。

第4章 極低温破壊・損傷力学解析

本章では、G-11 の極低温破壊・変形挙動を解明するため、1TCT 試験片および 0.32TCT 試験片の極低温破壊靱性試験に関する損傷・破壊力学解析を行った⁽¹²⁾。また、数値シミュレーション結果と実験結果を比較し、解析モデルおよび解析方法の妥当性を検証した。織物ガラス－エポキシ積層材料の有効弾性定数は、繊維・母材の実測値と織物構造を考慮した RVE (Representative Volume Element) 法を用いて求めた。繊維の破断を伴う損傷の発生・進展は、Hoffman の破壊則を用いた数値計算手法により解析し、母材の微視破壊は、最大ひずみ説に従った。また、応力拡大係数は、全エネルギー法を用いて求めた。

77K における荷重－変位曲線の数値シミュレーション結果は、切欠き長さおよび試験片寸法に依存せず実験結果と良く一致したが、室温および 4K における数値シミュレーション結果は、実験結果と少し相違が認められた。4K の場合は、破壊挙動に及ぼす発熱・温度上昇の影響が顕著になるためと考えられる。また、室温および 77K における損傷領域の進展シミュレーションを行った結果、損傷進展の定性的傾向は実験結果とほぼ一致した。

有限要素法による数値シミュレーションを行って求めた荷重 P_Q および P_{max} に対する見掛けの破

破壊靱性 K_Q^{FEM} および $K^{FEM}(P_{max})$ は、ISO 規格の評価式より求めた見掛けの破壊靱性 K_Q および $K(P_{max})$ と同様に、温度依存性を有し、切欠き長さに依存せず試験片寸法の増大に伴い増大した。また、 $K^{FEM}(P_{max})$ は K_Q^{FEM} より大きく、損傷を考慮しない場合の K_Q^{FEM} と K_Q 、 $K^{FEM}(P_{max})$ と $K(P_{max})$ はほぼ同じ値を示し、損傷を考慮した場合の K_Q^{FEM} および $K^{FEM}(P_{max})$ は、損傷を考慮しない場合に比べ増大した。さらに、損傷領域の面積と荷重の関係を考慮して求めた見掛けの破壊靱性 K_i^{FEM} は、 K_Q^{FEM} および $K^{FEM}(P_{max})$ に比べ小さな値を示し、切欠き長さに依存せず試験片寸法の増大に伴い増大した。

第5章 極低温破壊・変形に伴う擾乱エネルギー

本章では、G-11 の極低温破壊に伴う発熱・温度上昇を解明するため、動的ひずみエネルギー解放率に基づいて擾乱エネルギーを有限要素解析した。擾乱エネルギー評価は、これを発熱源とする非定常温度場解析を行い、実験結果に理論的検討を加える上で有効である。

動的応力拡大係数および動的ひずみエネルギー解放率は、き裂伝播速度の増大に伴い減少した。また、擾乱エネルギーも、き裂伝播速度の増大に伴い減少し、動的応力拡大係数および動的ひずみエネルギー解放率と同様な傾向を示した。

第6章 結論

本章は、結論であり、各章で述べた内容を概括すると共に、得られた知見を整理して本論文の統括としている。

参考文献

- (1) K.Sanada, Y.Shindo and S.Ueda : *Engineering Fracture Mechanics*, 59 (1998), 501.
- (2) K.Sanada, Y.Shindo and S.Ueda : *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 28 (1998), 183.
- (3) 王瑞, 進藤裕英, 堀口勝三, 真田和昭 : 低温工学, 32 (1997), 18.
- (4) 進藤裕英, 東海林仁, 真田和昭, 堀口勝三, 工藤弘行 : 低温工学, 34 (1999), 15.
- (5) Y.Shindo, K.Horiguchi, K.Sanada, T.Kobori, H.Nakajima and H.Tsuji : *Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference*, 3 (1997), 1887.
- (6) 進藤裕英, 高橋知貴, 堀口勝三, 小堀智之, 真田和昭 : 溶接学会論文集, 15 (1997), 370.
- (7) 真田和昭, 進藤裕英, 堀口勝三 : 低温工学, 31 (1996), 540.
- (8) Y.Shindo, K.Sanada and K.Horiguchi : *Advances in Cryogenic Engineering*, 42 (1996), 129.
- (9) K.Sanada, Y.Shindo and K.Horiguchi : *Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference*, 3 (1997), 1981.
- (10) K.Sanada, Y.Shindo, H.Tokairin and K.Horiguchi : *Proceedings of International Conference on Materials and Mechanics '97 (JSME)*, (1997), 67.
- (11) 真田和昭, 進藤裕英, 堀口勝三, 東海林仁 : 日本金属学会誌, 62 (1998), 232.
- (12) 真田和昭, 進藤裕英, 工藤弘行 : 日本金属学会誌, 63 (1999), 印刷中.

審査結果の要旨

本論文は、核融合炉超伝導マグネット等の電氣的熱的絶縁材料、構造支持材料さらに浸水防止材料として注目されている織物ガラスーエポキシ積層材料の極低温破壊・変形挙動に関する理論的・実験的研究成果をまとめたもので、全編6章からなる。

第1章の序論では、積層材料の極低温破壊靱性評価方法の問題点および本研究で対象とした織物ガラスーエポキシ積層材料の極低温破壊・変形挙動に関する研究の位置付けを述べると共に、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第2章では、織物ガラスーエポキシ積層材料 G-11 の 0.32T コンパクト試験片を用いた室温、液体窒素温度（77K）および液体ヘリウム温度（4K）における平面ひずみ破壊靱性（ K_{Ic} ）試験および熱電対による極低温破壊・変形に伴う発熱・温度上昇計測を行い、見掛けの破壊靱性に及ぼす試験温度、切欠き長さ、クロスヘッド速度の影響を明らかにしている。また、走査電子顕微鏡による破面観察を行い、損傷領域は、エポキシ樹脂の複雑な割れ、ガラス繊維・エポキシ樹脂の界面剥離、ガラス繊維の破断等で構成され、極低温における荷重－変位曲線の非線形挙動および破壊靱性増大の原因と考えられることを示している。

第3章は、G-11 のコンパクト試験片（0.32T, 1T）を用いた室温、77K における平面ひずみ破壊靱性（ K_{Ic} ）試験および弾塑性破壊靱性（ J_{Ic} ）試験を行ったもので、見掛けの破壊靱性に及ぼす試験片寸法の影響を明らかにしている。また、見掛けの破壊靱性の寸法効果は、荷重－変位曲線の非線形挙動および損傷と密接に関係し、試験温度低下に伴い弱くなる傾向を示しており、0.32T コンパクト試験片の場合に比べて、1T コンパクト試験片の場合、77K における荷重－変位曲線の非線形挙動に及ぼす損傷の影響が小さくなる結果を得ている。

第4章では、G-11 のコンパクト試験片の極低温破壊靱性試験に関する損傷・破壊力学解析を行い、極低温破壊・変形挙動に及ぼす損傷および試験片寸法の影響を明らかにしている。また、数値シミュレーション結果と実験結果を比較し、解析モデルおよび解析方法の妥当性を検証している。

第5章では、動的ひずみエネルギー解放率に基づいて擾乱エネルギーを有限要素解析し、擾乱エネルギーに及ぼすき裂伝播速度の影響を明らかにしている。擾乱エネルギー評価は、これを発熱源とする非定常温度場解析を行い、実験結果に理論的検討を加える上で有効である。

最後に、第6章の結論では、各章で述べた内容を概括すると共に、得られた知見を整理して本論文の統括としている。

以上要するに、本研究は、織物ガラスーエポキシ積層材料の極低温破壊・変形挙動の理論的・実験的解明に成功し、極低温有機複合材料設計・開発・評価に資する結果を提供したもので、材料加工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。